



# MODELE DE HILL APPLIQUE A LA DETERMINATION DE LA SURFACE EQUIVALENTE D'UN MATERIAU ABSORBANT

Philippe Besnier, Mihai Ionut Andries, Christophe Lemoine

## ► To cite this version:

Philippe Besnier, Mihai Ionut Andries, Christophe Lemoine. MODELE DE HILL APPLIQUE A LA DETERMINATION DE LA SURFACE EQUIVALENTE D'UN MATERIAU ABSORBANT. Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ÉlectroMagnétique (CEM2014), Sep 2014, Clermont-Ferrand, France. hal-01080726

**HAL Id: hal-01080726**

**<https://hal.science/hal-01080726>**

Submitted on 6 Nov 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# MODELE DE HILL APPLIQUE A LA DETERMINATION DE LA SURFACE EQUIVALENTE D'UN MATERIAU ABSORBANT

Philippe Besnier, Mihai Ionut Andries, Christophe Lemoine

<sup>1</sup> IETR UMR CNRS 6164 - INSA de Rennes, Département Antennes et Dispositifs Hyperfréquences  
20 av. des Buttes de Coësmes 35708 Rennes France, E-mail : philippe.besnier@insa-rennes.fr

**Résumé.** Cette communication traite d'une méthode de mesure électromagnétique en chambre réverbérante visant à déterminer l'efficacité d'absorption d'un objet placé à l'intérieur. L'objet est soumis au champ stationnaire créé dans l'enceinte réverbérante entretenu à très haute fréquence vis-à-vis de la dimension de la cavité. Sur le plan théorique, la surface équivalente est évaluée au moyen de l'hypothèse du spectre d'ondes planes de Hill pour un absorbant de forme parallélépipédique dont on connaît les propriétés électromagnétiques. L'absorption d'énergie est évaluée expérimentalement au moyen de l'estimation de la bande de cohérence.

## I. INTRODUCTION

L'énergie électromagnétique moyenne emmagasinée dans une chambre réverbérante dépend de la superposition d'un certain nombre de modes. La présence d'un objet absorbant a pour conséquence la modification du coefficient de qualité moyen associé à l'ensemble des modes excités. Ainsi la détection d'une modification du coefficient de qualité composite peut être à l'origine d'une méthode de détermination du pouvoir absorbant d'un objet placé dans la chambre. Cette proposition a été introduite par M. Andries dans sa thèse soutenue à l'INSA de Rennes en Avril 2013 [1] et synthétisée dans l'article [2]. Nous commençons par définir la notion de surface équivalente moyenne d'absorption et comparons cette notion à la notion habituelle de réflectivité d'un absorbant. Nous montrons en particulier que cette surface est proche à une correction près de la demi-surface visible d'un absorbant parallélépipédique de dimension suffisante que multiplie le coefficient de transmission de l'onde dans le milieu absorbant. Cette évaluation est effectuée au moyen du modèle de Hill. Puis, nous nous attachons à évaluer cette même surface au moyen de la mesure de la bande de cohérence moyenne des signaux enregistrés dans la chambre sur un ensemble de positions de brasseur. Le lien entre la bande de cohérence et la puissance moyenne absorbée par l'objet est également établi selon l'hypothèse du spectre d'ondes planes. Différents résultats de mesure contribuent à valider cette estimation. Ils s'appuient sur la mise en œuvre de matériaux absorbants homogènes dont les paramètres constitutifs sont préalablement connus.

## II. THEORIE

Nous définissons la surface équivalente moyenne d'absorption (SEMA)  $\sigma_{objet}$  d'un objet par :

$$P_R = \sigma_{objet} D_p \quad (1)$$

La SEMA relie la puissance absorbée  $P_R$  par l'objet à la densité de puissance incidente sur l'objet  $D_p$ . Par contraste, on peut également définir la surface équivalente de diffraction de l'onde. Ainsi, si nous supposons une onde plane en incidence normale à la surface  $S$  d'un absorbant pratiquement parfait (adaptation d'impédance et absorption intégrale de l'énergie dans son épaisseur), on trouve  $\sigma_{objet} \approx S$  et la surface équivalente de diffraction sera nulle.

Dans le cadre de mesures en espace libre, l'absorbant est illuminé selon une onde plane dont on ajuste l'angle d'incidence et seule une mesure de réflectivité dans la direction spéculaire est effectuée.

Tentons d'imaginer ce qu'une procédure de mesure en chambre réverbérante permettrait d'obtenir. Nous poursuivons l'expérience de pensée qui consiste à considérer que l'absorbant évoqué ci-dessous est quasi-idéal. Placé dans une chambre réverbérante, au sein de laquelle on modifie la pondération des modes de propagation au moyen d'un procédé de brassage, l'objet est alors illuminé, en première approximation, selon aucune direction ou polarisation préférentielle. Nous faisons l'hypothèse que nous sommes suffisamment proche d'un champ idéalement désordonné au sens du spectre infini d'ondes planes de Hill [3]. Supposons que l'absorbant soit de forme cubique. De nouveau, nous le considérons comme parfaitement adapté. De plus nous formulons l'hypothèse, certes irréaliste, d'un absorbant dont l'épaisseur de peau tend vers 0. L'absorption s'effectue alors intégralement à la surface de l'absorbant. Dans ces conditions, on montre aisément que sous illumination par le spectre d'ondes planes, un tel absorbant aura pour SEMA :

$$\sigma_{objet} \approx A_{objet} / 2 \quad (2)$$

Où  $A_{objet}$  représente l'aire de l'absorbant cubique.

Ainsi, un absorbant idéal cubique en chambre réverbérante aura pour aire effective la moitié de son aire. Ce résultat peut être étendu immédiatement à un absorbant parallélépipédique.

Nous nous intéressons par la suite à la performance réelle d'un absorbant réel, en vue de confrontations expérimentales. Connaissant (à la fréquence de travail) l'épaisseur de peau  $\delta$ , nous supposons l'absorbant de dimension  $a \times b \times d$  avec  $\delta < \min(a, b, d)$ . Dans ces conditions on montre que la SEMA devient [1]:

$$\sigma_{objet} = T \left[ \frac{A_{objet}}{2} - \left( \frac{4}{\pi} \delta (a + b + d) - \frac{3\delta^2}{\pi} \right) \right] \quad (3)$$

Dans cette expression  $T$  représente le coefficient moyen de transmission de l'onde incidente dans l'absorbant. La validation de cette estimation a été effectuée au moyen d'un absorbant parallélépipédique émanant de la société SIEPEL dont nous avons obtenu communication des paramètres constitutifs en fonction de la fréquence (permittivité complexe).

La surface équivalente d'absorption est évaluée expérimentalement au moyen de l'estimation du contraste de la bande de cohérence obtenue après insertion de l'objet absorbant dans la chambre.

### III. PRINCIPE DE MESURE

Le principe de la mesure repose sur une estimation de la bande de cohérence fréquentielle de la chambre. Par définition la bande de cohérence est inversement proportionnelle au coefficient de qualité composite. Tout comme le coefficient de qualité composite, la bande de cohérence peut être considérée comme une variable aléatoire dont on cherche à estimer l'espérance empirique, sans toutefois présupposer de la distribution de cette variable aléatoire ou de celle du coefficient de qualité composite, objet de travaux très récents [5]. Nous nous limitons dans ce qui suit à évaluer l'espérance empirique de la bande de cohérence avec une incertitude limitée afin d'être sensible au contraste associé à la présence d'un absorbant potentiellement de faible volume dans la chambre.

Pour ce faire, la bande de cohérence est déterminée au moyen d'échantillons constitués de relevés de mesure en des fréquences consécutives suffisamment rapprochées pour constituer un échantillon corrélé et de suffisamment grande dimension pour estimer la bande de cohérence sur l'intervalle de fréquence correspondant. Cette estimation est réitérée pour un nombre élevé de positions de brasseurs (100 positions).

Le coefficient de qualité composite de la chambre et sa relation à la bande de cohérence sont donnés par :

$$Q = \frac{f}{\Delta f_{3dB}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{f}{B_c^{cpx,0,7}} \quad (4)$$

Cette relation est ici donnée pour une définition spécifique de la bande de cohérence  $B_c$  symbolisée par l'exposant « cpx, 0,7 » Ceci signifie que la bande de cohérence est définie au sens du seuil égal à 0,7 de la fonction d'autocorrélation de la réponse (complexe) en fréquence de la chambre.

#### III.1. Evaluation de la bande de cohérence pour une chambre vide

Tout comme en ce qui concerne l'estimation théorique de la SEMA, on admet que la chambre réverbérante est très largement surdimensionnée et que le champ électromagnétique est idéalement désordonné. Dans ces conditions, le coefficient de qualité peut être décrit sous la forme :

$$Q = \frac{2\pi f V E_0^2}{\eta c P_D} = \frac{2\pi f V E_0^2}{\eta c P_T} \quad (5)$$

Dans cette expression,  $f$  est la fréquence d'analyse,  $V$  le volume de la chambre,  $E_0$  l'amplitude moyenne des ondes du spectre d'onde plane au sens de Hill,  $c$  la vitesse de la lumière et  $P_D$  représente la puissance dissipée dans la chambre, identique en l'occurrence à la puissance transmise  $P_T$ . Le terme  $\eta$  représente quant à lui l'impédance d'onde dans le vide. La densité de puissance moyenne  $S_0$ , toujours au sens du spectre d'onde plane est donc implicitement supposée telle que :

$$S_0 = \frac{E_0^2}{\eta} \quad (6)$$

La puissance émise et dissipée  $P_D$  dans la chambre peut être définie comme le produit de la densité de puissance moyenne par une surface équivalente d'absorption de la chambre à vide  $\sigma_0$  :

$$P_D = S_0 \sigma_0 \quad (7)$$

Compte tenu de (4), (5) et (6), la puissance dissipée peut être exprimée en fonction de la bande de cohérence de la chambre à vide  $B_{c0}$  :

$$P_D = \frac{1}{\pi \sqrt{3}} \frac{c P_T}{B_{c0} V} \sigma_0 \quad (8)$$

#### III.2. Evaluation de la bande de cohérence pour une chambre en présence d'un objet absorbant

Nous émettons d'emblée l'hypothèse que les mécanismes de pertes dans la chambre et dans l'objet sont indépendants. Par conséquent, à puissance transmise  $P_T$  constante on admet que la puissance dissipée résulte de la combinaison des facteurs de qualité de la chambre vide et de l'objet :

$$\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_{vide}} + \frac{1}{Q_{objet}} \quad (9)$$

Dès lors, en présence de l'objet, la répartition de la puissance dissipée s'établit suivant l'équation suivante faisant apparaître la contribution nouvelle de l'objet inséré dans la chambre.

$$P_D = \frac{1}{\pi\sqrt{3}} \frac{cP_T}{B_{cC}V} (\sigma_0 + \sigma_{objet}) \quad (10)$$

### III.3. Estimation de la SEMA d'un objet absorbant

La surface équivalente moyenne d'absorption de l'objet peut alors être déduite des estimations de la bande de cohérence en l'absence puis en présence de l'objet.

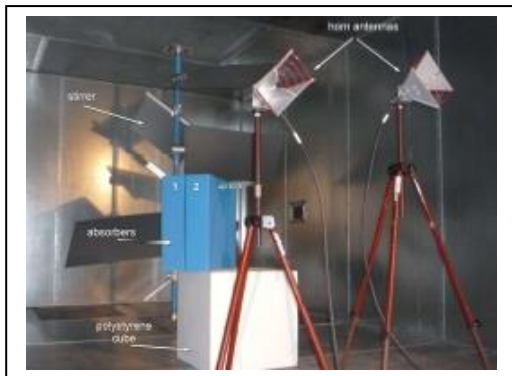
$$\hat{\sigma}_{objet} = \frac{V\pi\sqrt{3}}{c} (\hat{B}_{cC} - \hat{B}_{c0}) \quad (11)$$

L'estimation de la bande de cohérence est réalisée au moyen de la mesure du coefficient de réflexion complexe ( $S_{11}$ ) d'une antenne placée dans la chambre.

Pour chaque position de brasseur, le signal reçu par l'antenne d'émission est acquis sur une bande passante de 10 MHz avec une résolution de 50 kHz. Après compensation de la moyenne (assimilable à une erreur d'estimation ou au niveau résiduel d'énergie cohérente), la bande de cohérence correspondante à chaque position de brasseur est déduite de l'analyse de la fonction d'autocorrélation au premier ordre. L'estimation finale de la bande de cohérence est prise comme la moyenne des estimations sur l'ensemble des positions de brasseur.

Deux antennes ont été simultanément utilisées de sorte à doubler le nombre de réalisations en exploitant les deux ports de l'analyseur de réseau utilisé. Seuls les paramètres  $S$  en réflexion sont utilisés pour chaque antenne.

Une configuration typique de mesure est illustrée sur la photo ci-dessous. Deux antennes cornets sont utilisées et émettent principalement dans des directions non en ligne de vue l'une de l'autre, ni de l'objet absorbant sous test. L'absorbant est placé sur un cube de polystyrène qui peut être considéré comme neutre, permettant ainsi à l'objet d'être illuminé sous tous les angles.



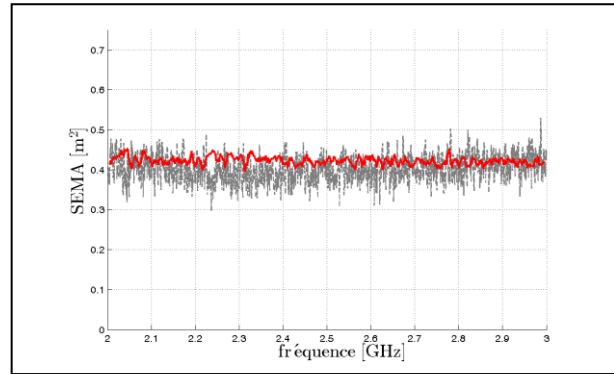
### Photo 1 Configuration de test typique pour la mesure de SEMA

L'objectif donc dans ce qui suit de comparer l'estimation de la SEMA réalisée à partir des relevés expérimentaux de la réponse fréquentielle de la chambre (11) à l'estimation théorique donnée par (3), dont l'établissement repose sur le modèle du champ idéalement désordonné.

## IV. CONFRONTATION THEORIE EXPERIENCE

### IV.1. Evaluation de la SEMA d'un absorbant

L'absorbant installé dans la chambre est de type P150 et sa dimension est de  $60 \times 60 \times 15$  cm<sup>3</sup>. Son épaisseur de peau dans la bande de fréquence 2 GHz à 3 GHz est de l'ordre de 3 cm, selon l'estimation effectuée à partir des paramètres constitutifs de l'absorbant. Les résultats de mesure sont reportés Fig.1, figure qui fait apparaître en ordonnée la SEMA de cet absorbant dont l'aire est de 1,08 m<sup>2</sup>.



**Fig.1** SEMA de l'absorbant P150 entre 2 et 3 GHz estimée expérimentalement au moyen de la méthode présentée dans cet article (courbe rouge) et de la méthode proposée en [4].

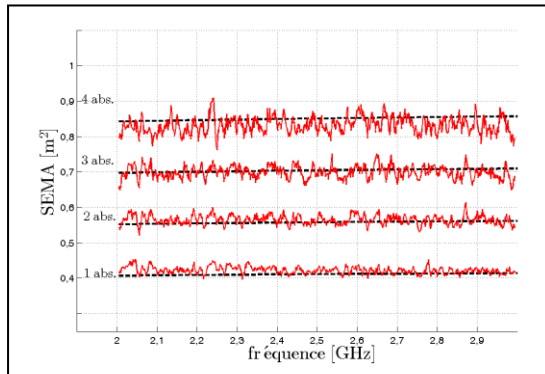
Il découle que la SEMA mesurée est environ égale à 0,41 m<sup>2</sup> sur toute la bande. A partir de la permittivité complexe du matériau, on établit que  $T$  est environ égal à 0,85 ce qui donne sans le terme correctif entre grandes parenthèses de l'équation (3) une valeur de SEMA environ égale à 0,46. La prise en compte du terme entre crochets permet d'aboutir à la valeur finale de 0,43 donc assez proche de l'estimation provenant de la mesure.

### IV.2. Evaluation de la SEMA de plusieurs absorbants accolés

Au-delà, de cette première vérification expérimentale, nous confrontons les évaluations théoriques et expérimentales de la SEMA pour différentes

combinaisons d'absorbants du même type. Plusieurs absorbants de même taille sont accolés à l'instar de la photo 1 sur laquelle figurent 2 absorbants. L'absorbant P150 est homogène. Par conséquent, du point de vue théorique, la SEMA de l'objet évolue seulement (équation (3)) suivant les nouvelles dimensions  $a, b, d$  équivalentes à l'association des absorbants.

La figure 2 synthétise les résultats obtenus pour l'association de 2,3 ou 4 absorbants. Pour mémoire, le résultat obtenu avec un seul absorbant est également reporté.



**Fig. 2** Evaluation de la SEMA associée à 1,2,ou 3 ou 4 absorbants. Les courbes oscillantes correspondent aux estimations expérimentales selon (11). Les courbes en traits pointillés correspondent à l'évaluation théorique selon (3)

Il apparaît tout d'abord que l'incertitude de l'estimation est raisonnable et permet de très bien différencier les différentes situations. D'autre part, la confrontation avec les évaluations théoriques (courbes en traits pointillés noirs) est tout à fait satisfaisante. Deux constats doivent cependant être faits. Tout d'abord la distribution des résultats empiriques n'est pas uniforme autour de la valeur théorique, ce qui peut résulter d'un léger biais d'estimation. Ce biais d'estimation n'a pas d'origine établie. Il peut en effet procéder d'un biais d'estimation des paramètres constitutifs de l'absorbant tout aussi bien que d'un biais d'estimation théorique, ou encore de l'imperfection résiduelle du champ censé être statistiquement uniforme et homogène dans la chambre réverbérante. D'autre part, la très faible croissance de la SEMA avec la fréquence constatée théoriquement n'est pas constatée sur le plan expérimental. Ceci pourrait s'expliquer par l'impossible détection de variations aussi faible à l'aide du protocole de mesure choisi. Il apparaît cependant que cette estimation est raisonnablement proche du modèle pour convenir que celui-ci est acceptable compte tenu d'erreurs d'estimation qui ne semblent pas excéder 10%.

## V. CONCLUSIONS

Cette communication porte sur une évaluation de l'estimation du pouvoir absorbant en chambre réverbérante. L'estimation réalisée à partir de la mesure de la surface équivalente moyenne d'absorption présentée par un objet absorbant de forme simple est extraite expérimentalement à partir de l'hypothèse du spectre d'ondes planes. Ce résultat expérimental est rapproché d'une évaluation entièrement théorique dont les paramètres de calcul initiaux sont les paramètres constitutifs du matériau (permittivité complexe). L'observation des résultats permet de conclure que l'hypothèse du spectre d'ondes planes est raisonnable dans le cadre de l'analyse du pouvoir absorbant d'un objet immergé dans le volume de travail de la chambre. Il convient naturellement de préciser que les bandes de fréquence choisies pour la mesure se situent dans un domaine de fréquence très élevé au regard des dimensions de la chambre. L'estimation de la SEMA rapportée à l'aire d'un absorbant (de forme convexe) représente une réelle opportunité d'évaluation de performances d'absorbants électromagnétiques en chambre réverbérante. Une telle analyse menée à des fréquences pour lesquelles la densité de mode serait trop limitée conduirait inévitablement à des déviations plus importantes par rapport au modèle théorique. Cela rejoint les préoccupations liées à l'obtention d'un champ idéalement diffus en régime de fréquence intermédiaire.

## REFERENCES

- [1] M.I Andries, 'Research of experimental methods to simulate propagation channels in mode-stirred reverberation chamber, thèse de doctorat, INSA de Rennes, Avril 2013
- [2] M.I. Andries, P. Besnier, C. Lemoine " *On the Prediction of the Average Absorbing Cross Section of Materials from Coherence Bandwidth Measurements in Reverberation Chamber*", EMC EUROPE 2012, Roma, 17-21 Sept 2012
- [3] D.A. Hill, " Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers", IEEE Transactions on EMC, vol. 40, n°3, pp. 209-217, 1998
- [4] D.A. Hill, M.T. Ma, A.R. Ondrejka, B.F. Riddle, M. Crawford, and R.T. Johnk, "Aperture excitation of electrically large, lossy cavities, IEEE Transactions on EMC, vol. 36, n°3, pp. 169-178, 1994
- [5] L. Arnaut, G. Gradoni "Probability distribution of the Quality factor of mode-stirred reverberation chamber", IEEE trans. EMC, vol. 55, n°1, pp. 35-44, 2013